

VERGLEICHENDE MESSUNG
DER LINEAREN ABBINDEEXPANSION
ZAHNÄRZTLICHER GIPSE
MIT VIER VERSCHIEDENEN VERFAHREN

VON
HARTMUT BOHN

1976

VERGLEICHENDE MESSUNG
DER LINEAREN ABBINDEEXPANSION
ZAHNÄRZTLICHER GIPSE
MIT VIER VERSCHIEDENEN VERFAHREN

von

HARTMUT BOHN

Aus der Abteilung für zahnärztliche Werkstoffkunde und
Technologie (Leiter: Prof. Dr. H. Marx) der Klinik und
Poliklinik für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten der
Johannes Gutenberg-Universität Mainz

VERGLEICHENDE MESSUNG
DER LINEAREN ABBINDEEXPANSION
ZAHNÄRZTLICHER GIPSE
MIT VIER VERSCHIEDENEN VERFAHREN

Inauguraldissertation
zur Erlangung der Doktorwürde der Zahnheilkunde
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz,
den Medizinischen Fachbereichen vorgelegt

von

Hartmut Bohn
aus Geislingen

Mainz 1976

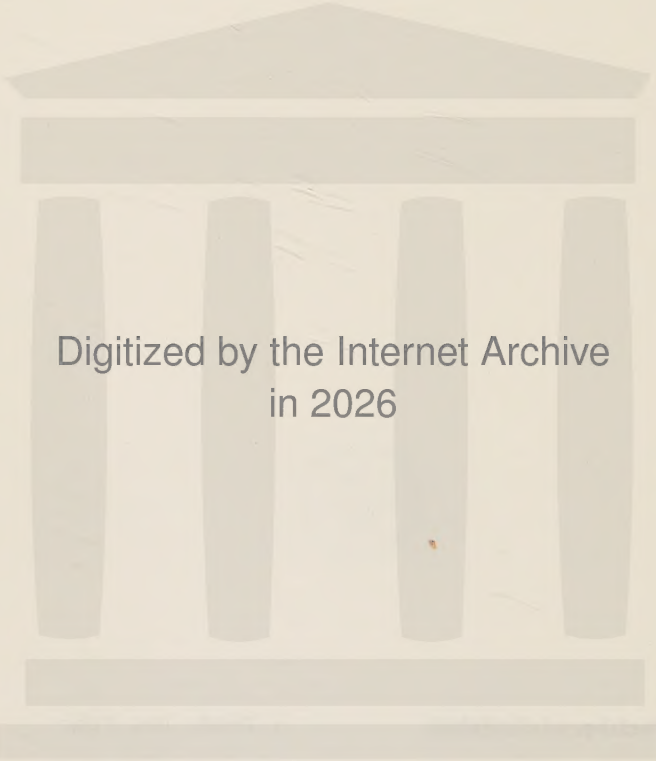


Fachbereichsdekan : Prof. Dr. Fuhr

1. Gutachter: : Prof. Dr. Marx

2. Gutachter: : Prof. Dr. Fuhr

Tag der mündlichen Prüfung : 20. Okt. 1976



Digitized by the Internet Archive
in 2026

MEINEN ELTERN
IN DANKBARKEIT
GEWIDMET

I N H A L T

=====

	Seite
1. Einleitung	2
2. Problemstellung	3
3. Allgemeine Versuchsbedingungen	4
4. Die 4 Verfahren	5
5. Versuchsdurchführung	16
6. Ergebnisse - Tabellen - Graphiken	17
7. Ergebnisse - Auswertung	26
8. Die Prüfverfahren - Erfahrungen und Kritik	34
9. Statistische Auswertung	38
10. Zusammenfassung	41
11. Anhang	43
12. Literaturverzeichnis	45

1. Einleitung

Der große Pionier der Zahnheilkunde GYSI war einer der ersten, die sich mit der Abbindeexpansion von Gips beschäftigten. Er füllte Gips in Glasgefäße und konnte durch die Größe der Sprünge, die der expandierende Gips verursachte, ungefähre Aussagen über das Volumenverhalten machen (2).

Gips als Werkstoff ist heute weniger denn je aus Zahnmedizin und Zahntechnik wegzudenken. Immer komplexere Verfahren, die zu immer hochwertigeren Ergebnissen führen sollen, z.B. bei der Herstellung von Zahnersatz, erfordern Modellmaterialien mit ebenso differenten wie spezifischen Materialeigenschaften.

So liegt es auf der Hand, daß auch die Materialprüfung in steigendem Maße an Bedeutung gewinnt, Spezifikationen, wie die der ADA Nr. 25 und die DIN 13 911 unterstreichen die bestehende Tendenz, feste Normen zur Festlegung der Mindestanforderungen und Prüfbedingungen zu schaffen. Die Klassifizierung der Gipse gemäß Anwendungsbereich, die Entwicklung ganz neuer, z. T. synthetischer Modellmassen, ausgerichtet auf hochspezialisierte Arbeitsgänge - wie z.B. die Spritzgußtechnik in der Kunststoffverarbeitung - runden das Bild ab.

Dabei kommt dem Volumenverhalten der bei der Herstellung von Zahnersatz verwendeten Materialien besondere Bedeutung zu. Variierende Angaben der Abbindeexpansion in der Literatur ließen darauf schließen, daß bei ihrer Messung das Verfahren eine spezielle Rolle zu spielen scheint.

So sollen in dieser Arbeit unterschiedliche Methoden zur Messung der linearen Gipsabbindeexpansion, die eine zentrale Stellung in diesem Problemkreis einnimmt, zur Untersuchung kommen, um Aufschluß über ihren Einfluß zu erhalten.

2. Problemstellung

Die Aufgabenstellung umfaßte die Messung der linearen Abbindeexpansion verschiedener Gipse anhand 4 unterschiedlicher Verfahren. Die Untersuchung galt nicht primär den unterschiedlichen Expansionswerten der einzelnen Gipse sondern dem Vergleich der 4 Meßverfahren im Hinblick auf Durchführbarkeit, Meßgenauigkeit, Ergebniskonstanz und Fehlermöglichkeiten.

Zur Untersuchung kamen folgende Gipssorten, in alphabetischer Reihenfolge:

1. Alabastergips Non plus ultra (Hinrichs, Osterode)
2. Alphadur 700 (Schütz-Dental, 6365 Rosbach v.d.H.)
3. Begodur (Bremer Goldschlägerei, Wilh. Herbst)
4. Duroc (Ransom & Randolph)
5. Moldabaster (Bayer, Leverkusen)
6. Moldano (Bayer, Leverkusen)
7. Moldaroc (Bayer, Leverkusen)
8. Rapidur (Dentaurum, Pforzheim)
9. SR Ivocap (Ivoclar AG)
10. Tewestone (A. Kettenbach)
11. Velmix Stone (Kerr)
12. Wipogranit. (A. u. W. Wiegelmann, Bonn)

Erfaßt wurden somit 2 Alabastergipse (1,5), 4 Hartgipse (6,8,9,12) und 6 Stone-Gipse (2,3,4,7,10,11). 9 und 12 sind Spezial-Hartgipse für die Spritzgußtechnik, wobei 9 entsprechend seiner Anwendung auf hohe Expansion ausgelegt ist. Alphadur 700 und Tewestone sind synthetische Gipse.

Die lineare Abbindeexpansion wurde mit folgenden Geräten bestimmt:

- I) Quellungsmeßgerät
- II) Extensometer gemäß DIN-Entwurf 13 911
- III) Apparatur zur Prüfung der Abbindeexpansion gem. ADA-Spezifikation Nr. 25 in Verbindung mit einem Meßmikroskop (der Einfachheit halber im folgenden kurz als "Meßmikroskop" bezeichnet).
- IV) Elektronisches Meßverfahren mit induktivem Aufnehmer und Schreiber.

3. Allgemeine Versuchsbedingungen

In Abhängigkeit vom Gerät wurden zwischen 100 und 500 g Gips je Versuch benötigt. Die Gipse wurden entsprechend der Herstelleranweisung verarbeitet, Gipspulver und destilliertes, temperiertes Wasser wurden exakt abgewogen.

Pro Gips und Verfahren wurden 3 Versuche durchgeführt und hieraus der Mittelwert errechnet. Die Angabe der Expansion erfolgte mit einer Genauigkeit von 0,01 %. Die Versuchsdauer betrug jeweils 2 Stunden nach Mischbeginn in Anlehnung an ADA-Spezifikation Nr. 25 (10), die ebenso wie der Entwurf der DIN Nr. 13 911 (9) diesen Zeitraum als Versuchsdauer für die Expansionswertbestimmung angibt (s. Anhang). Der DIN-Entwurf setzt die maximalen Expansionswerte der einzelnen Gipstypen nach 24-Stunden-Messungen fest. Eigene Kontrollmessungen mit allen 4 Verfahren, die nach 24 Stunden vorgenommen wurden, ergaben, daß die Ergebnisse gar nicht oder nur unwesentlich von dem nach 2 Stunden abgelesenen Wert abwichen. Die geringen Differenzen waren, je nach Gips verschieden, nicht in einer Richtung signifikant, d.h. der 2-Stundenwert konnte sowohl wenig über wie auch unter dem nach 24 Stunden abgelesenen liegen. Hierfür sind wohl individuell verschiedene Abbindevorgänge einzelner Gipssorten verantwortlich zu machen, wie z.B. die nach 2 Stunden u.U. noch einwirkende thermische Expansion, verursacht durch die beim Abbinden freiwerdende Wärme, welche nach WEIKART in Abhängigkeit von Gipsart und -menge zu Temperaturen bis 50° C führen kann (11). Die Wärme wird je nach Apparatur und Gipsvolumen unterschiedlich lange im System gespeichert und kann Urheber sein für Überlagerung mit den Dimensionsänderungen infolge der auf makromolekularen Umbauvorgängen basierenden Abbindeexpansion.

4. Die 4 Verfahren

I) Das Quellungsmeßgerät (Abb. 1)

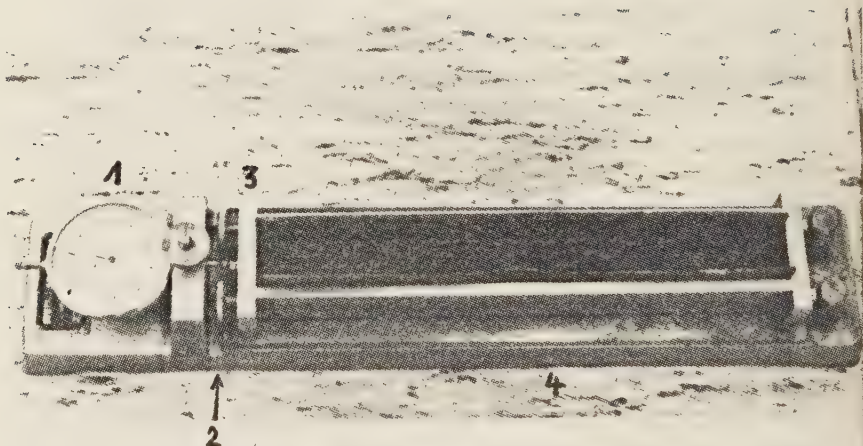
Das Quellungsmeßgerät der Frankfurter Firma Curt Weissgerber besteht aus folgenden Teilen: gußeiserne Grundplatte, Glasplatte als Wannenboden, Gummiplatte zur Auskleidung der Wanne, vierteilige Messingform mit den lichten Maßen (in mm) 333,33 x 40 x 40. Die eiserne Unterplatte weist an einem Ende zwei Stifte als Befestigungspunkt für die 4 Formplatten auf, an dem anderen Ende findet sich ein Quersteg mit eingelassener Meßuhr und zwei Rändelschrauben (6, 7; in Anlehnung an STAHL und STEGMAYER). Der auf der Glasplatte stehende Messingrahmen wird durch die Schaumgummiplatte derart ausgekleidet, daß nur die beiden Stirnseiten freibleiben, deren eine durch die erwähnten Stifte fixiert ist. Die andere ist nach Lösen der 2 Rändelschrauben in Längsrichtung verschieblich und steht mit dem Stempel der Meßuhr in direktem Kontakt. Bei Ausdehnung des Gipsprüfkörpers drückt dieser somit über die bewegliche Stirnplatte auf den Fühler der Uhr, an welcher die erfolgte Längenänderung auf 0,01 mm genau abzulesen ist. Bis zu Beginn der Messung wird die Form mittels der Arretierungsschrauben fixiert, und damit ist auch die Ausgangslänge des Prüfkörpers von exakt $1/3$ m gewährleistet. Die Umrechnung des abgelesenen Meßwertes (x in $1/100$ mm) ergibt sich so einfach nach der Formel:

$$\frac{x \cdot 3}{1000} = \% \text{ lineare Expansion.}$$

Die erforderliche Gipsmenge lag bei 500 g Pulver + Aqua dest. gemäß Standardkonsistenz pro Versuch. Nach Einfüllen des Gipsbreies wurden die Rändelschrauben gelöst und die Meßuhr auf 0 gestellt. Die beweglichen Teile der Apparatur wurden mittels Spezialöl gängig gehalten, um Fehler durch Reibungswiderstand und Adhäsionskräfte möglichst klein zu halten.

Abb. 1

Quellungsmeßgerät



1 = Meßuhr

2 = Rändelschrauben, dazwischen der Stempel der Meßuhr

3 = bewegliche Stirnplatte

4 = Gußeiserne Grundplatte, darauf
Glasplatte

Messingform

Schaumgummiauskleidung

II) Extensometer (Abb. 2)

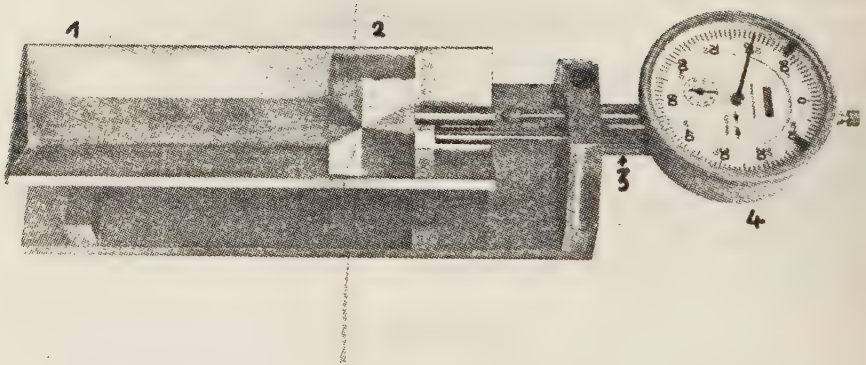
Das Gerät entspricht dem im DIN-Entwurf 13 911 angegebenen (9); das Meßverfahren ähnelt dem des Quellungsmeßgerätes. Das Extensometer besteht aus einer V-förmigen Messingwanne von ca. 140 mm Länge, der Winkel zwischen den Schenkeln beträgt 90° , die Schenkellänge 30 mm. Die eine Stirnseite ist fest abgeschlossen, die andere wird von einem frei verschiebbaren Messingwürfel gebildet, der über einen Stift in direktem Kontakt mit dem Fühler der Meßuhr steht. Mittels einer Arretierungsschraube wird der Würfel vor Versuchsbeginn fixiert, so daß die Innenlänge der Rinne auf $100 \text{ mm} \pm 0,1$ festgelegt ist. Nach dem Lösen der Feststellschraube drückt der expandierende Gipsprüfkörper über den beweglichen Würfel auf den Stempel der Meßuhr, welche auf 0,01 mm genau abzulesen ist. So ergibt sich durch die Prüfkörperlänge von 100 mm eine einfache Errechnung des prozentualen Expansionswertes nach der Formel

$$x / 100 = \% \text{ lineare Expansion}$$

(x = der auf der Meßuhr abgelesene Wert)

Die pro Versuch benötigte Gipsmenge betrug ca. 100 g. Vor dem Einbringen des Gipsbreies wurde die V-Rinne mit einer sogenannten "selbstschmierenden" Teflonfolie ausgekleidet, die sich durch extreme Hydrophobie und Gleitfähigkeit auszeichnet, so daß die Fehlerquelle "Reibungswiderstand" zwischen beweglichem Würfel und Rinne weitgehend außer acht gelassen werden konnte, außerdem wurde eine Adhäsion des Gipses an der Messingwand verhindert.

Abb. 2
Extensometer



- 1 = V-förmige Messingrinne
- 2 = beweglicher Messingwürfel mit zur Meßuhr gerichtetem Stift
- 3 = Feststellschraube (unter der Meßuhr)
- 4 = Meßuhr

Es fehlt die im Versuch zur Auskleidung der Rinne benutzte Folie

III) Apparatur zur Prüfung der Abbindeexpansion mit Meßmikroskop (Abb. 3-5)

- im Folgenden der Einfachheit halber kurz als "Meßmikroskop" bezeichnet. Die Apparatur entspricht der in der ADA-Spezifikation Nr. 25 (10) für dentale Gipsprodukte (s. Anhang) beschrieben und fand auch in den Werkstoffprüfungen von MERKATZ Anwendung (5). Die Messung der linearen Abbindeexpansion erfolgte hier an einem Gipsprüfkörper von 300 mm Länge, die erforderliche Gipsmenge lag bei 300 g pro Versuch. Der Gipsbrei wurde in eine V-förmige (90°) Messingrinne eingebracht, die mit der schon von Verfahren II bekannten Folie auf Teflonbasis ausgekleidet war. Der freie Raum zwischen den Stirnflächen der 400 mm langen Wanne wurde durch zwei Platzhalterklötze an beiden Enden auf 360 mm eingeschränkt. Die Klötze wurden nach Einfüllen des Gipses entfernt, somit ist eine ungehinderte Expansion ermöglicht. Zuvor jedoch wurden zwei gegeneinander verschiebbare Messingschienen in den Gipsbrei eingerüttelt, die zunächst durch einen Arretierungsstift fest verbunden waren und deren dem V-Querschnitt genau angepasste Schieber einen Abstand von 300 mm (=Prüfkörperlänge) hatten. In ihrer Mitte war eine feine Meßlinie eingraviert. Nach dem Einfüllen des Gipses und dem Einsetzen der Meßschienen wurde die Apparatur unter das Meßmikroskop gebracht, Platzhalterklötze und Arretierungsstift wurden entfernt. Im Fadenkreuz des Auflicht-Meßmikroskops wurde nun die Meßlinie eingestellt. Mikroskoptisch und Optik waren jeweils mit einer Genauigkeit von 0,01 mm abzulesen und einzustellen. Der expandierende Gips drückte nun die Schienen auseinander, nach 2 Stunden wurde die Verschiebung der beiden Meßlinienhälften abgelesen. Hierbei wurde wie folgt vorgegangen:

Die Ordinate des Fadenkreuzes wurde mit der Linie der einen Schiene durch Einstellen an der oberen Mikrometerschraube zur Deckung gebracht, die (untere) Mikrometerschraube des Objektisches stand dabei auf 0. Nun wurde durch Drehen an dieser Schraube der Tisch soweit verschoben, bis die Markierung der anderen Schiene sich mit

der Ordinate des Fadenkreuzes exakt deckte. An der Skala dieser Schraube konnte jetzt die Differenz zwischen beiden Linien in $1/100$ mm abgelesen werden. Die Expansion des 300 mm langen Prüfkörpers errechnete sich nach folgender Formel:

$$x/300 = \% \text{ lineare Expansion}$$

(x = abgelesener Differenzwert).

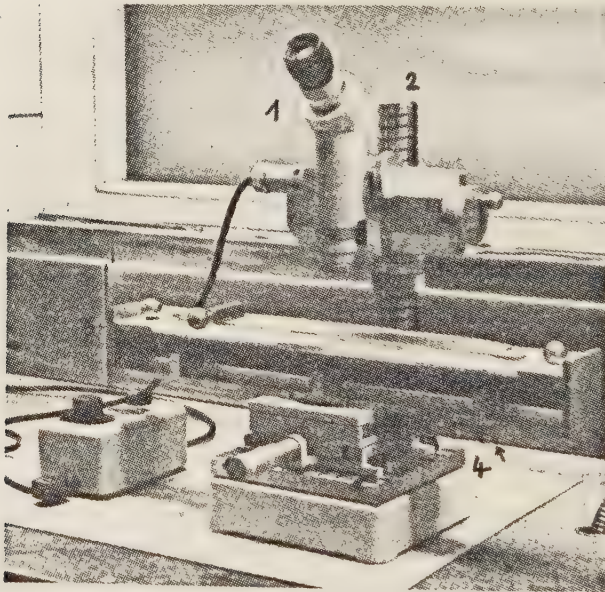


Abb. 3 Apparatur zur Prüfung der Abbindeexpansion
mit Meßmikroskop

- 1 = Auflichtmikroskop, rechts die Mikrometerschraube
- 2 = Stativ
- 3 = Prüfapparat, auf dem Mikroskoptisch fixiert
- 4 = Mikroskoptisch, rechts unter der Prüfapparat befindet sich die untere Mikrometerschraube (→)

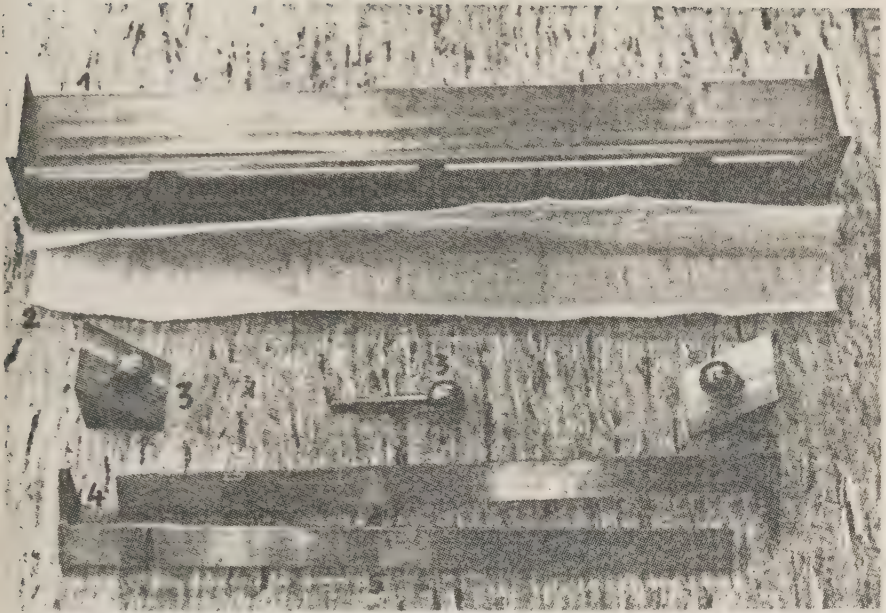


Abb. 4 u. 5, Apparatur zur Prüfung der Abbindeexpansion

1 = V-förmige Messingrinne

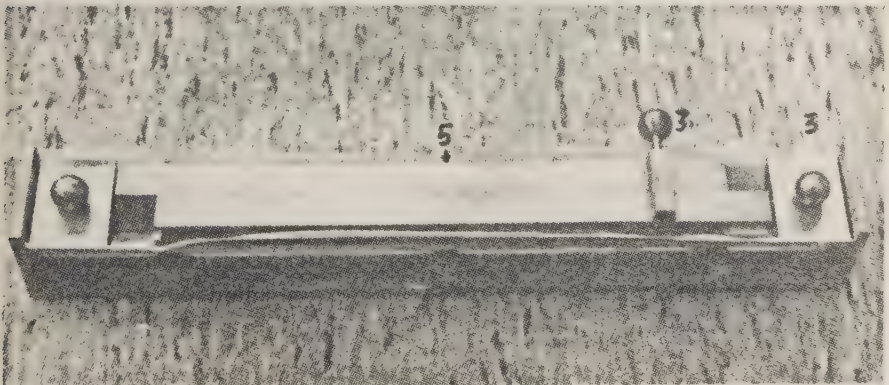
2 = Folie

3 = Platzhalterklötze, dazw. Arretierungsstift der

4 = Schienen, darauf die eingravierten

5 = Meßlinien

(Abb. 5: Apparatur zusammengesetzt)



IV) Elektronisches Meßverfahren mit induktivem Nehmer (Abb. 6 u. 7)

Dieses Verfahren ist von den drei bisher besprochenen besonders abzugrenzen. Hatten jene doch das gemeinsame Charakteristikum, daß der expandierende Gipsprüfkörper Teile mechanischer Meßgeräte direkt bewegte, die Anzeige erfolgte mechanisch via Meßuhr bzw. optisch über das Meßmikroskop.

Hier jedoch steht der Gipskörper nicht in direktem Kontakt mit dem die Längenänderung registrierenden Gerät, die Messung erfolgt "berührungslos". Das Verfahren hebt sich hervor durch einen großen technologisch- apparativen Aufwand, durch extreme Meßempfindlichkeit, aber auch durch eine relativ große Störanfälligkeit mit entsprechender Fehlerquote.

Das Prinzip besteht nun darin, daß durch die Abstandsänderung zwischen einem metallischen Prüfkörper und einer elektronischen Meßspule sich der Widerstand der Spule ändert, es entsteht eine Meßspannung, die mit Annäherung oder Entfernung des Prüfobjektes größer oder kleiner wird. Verwendet wurde der Aufnehmer Tr 102 der Firma Hottinger-Baldwin.

Diese Spannung wird elektronisch um ein Vielfaches verstärkt und derart gleichgerichtet, daß dem Anzeige- oder Registriergerät (hier einem elektrischen Schreiber) eine positive oder negative Spannung zugeführt wird. Der hier benutzte Trägerfrequenz-Meßverstärker für induktive Aufnehmer KWS 3071 der Firma Hottinger-Baldwin-Meßtechnik garantierte konstante Werte zwischen -20° und $+60^{\circ}$ C. (3)

Neben dem Aufnehmertyp, der Einbauanordnung und dem Material des Meßobjektes ist die Größe dieser Spannung in erster Linie abhängig von dem Ausgangsluftspalt zwischen Objekt und Meßspule sowie von der Luftspaltveränderung während des Versuches. Auf die elektronischen Einzelheiten dieses Verfahrens einzugehen würde hier zu weit führen, somit sei nur das zum Verständnis der Problematik Notwendige erwähnt.

Wichtig für eine exakte Registrierung ist eine möglichst hoch gewählte Empfindlichkeit, welche mit kleiner werdendem Ausgangsluftspalt zunimmt. Andererseits nimmt aber mit größerer Empfindlichkeit die Linearität ab, die Linearität als Ausdruck der Proportionalität zwischen mechanischem Meßweg und elektrischer Anzeige. Aufgrund der physikalischen Gesetzmäßigkeiten haben Temperaturschwankungen, auch in Abhängigkeit von dem verwendeten Material, Schwankungen der elektrischen Werte zufolge.

Als Prüfkörper diene ein Zylinder mit dem Durchmesser 30 mm und einer Seitenlänge von 50 mm. Aus der schon bei Verfahren II und III erwähnten Teflonfolie wurden entsprechende Zylinder hergestellt und auf einer Glasplatte aufrechtstehend festgewachst. Dieser Hohlzylinder wurde exakt bis zum Rand mit dem jeweiligen Gipsbrei in Standardkonsistenz gefüllt, wobei pro Versuch bis zu 100g Gipspulver benötigt wurden.

Durchführung:

Um die elektronische Messung zu ermöglichen, wurde nun auf den mit Gipsbrei gefüllten Zylinder eine quadratische Platte aus Eisenblech mit der Abmessung von 20 x 20 mm gelegt. Diese Platte war mittels Kreis und Pfeil markiert, so daß ihre Lage zur elektronischen Meßspule bei jedem Versuch exakt reproduziert werden konnte, wodurch Meßungenauigkeiten aufgrund der Materialeigenschaften des verwendeten Bleches, wie etwa unterschiedliche Dichte oder Blechstärke vermieden werden sollten.

Der Prüfkörper mit appliziertem Eisenblech wurde nun gemäß der Markierung unter der an einem Stativ befestigten Meßspule plziert. Der Ausgangsluftspalt betrug 1,5 mm, er mußte bei jedem Versuch kontrolliert bzw. nachgestellt werden.

Als nächstes erfolgte die genaue Abstimmung des Verstärkers mit anschließender Empfindlichkeitseinstellung; die Empfindlichkeit wurde für alle Versuche gleich groß gewählt. Im Anschluß hieran mußten Nullpunkt und Empfindlichkeit des elektrischen Schreibers eingestellt bzw. korrigiert werden. Als Letztes wurde die Bandbreite,

i.e. der volle Ausschlag des Schreibers, eingestellt, auch dieser Vorgang mußte bei jedem Versuch zwecks Korrektur wiederholt werden. Ein voller Ausschlag des Schreibers über 100 mm entsprach jeweils einer Luftspaltänderung zwischen Meßobjekt und Aufnehmerspule von 0,25 mm. Die Expansion des Gipses hatte eine Luftspaltverringern g zur Folge, die Luftspaltverminderung bewirkte einen Ausschlag des Schreibers nach rechts. (s. Abb. 12, S. 31) Die Versuche wurden nach folgender Einstellung durchgeführt:

Empfindlichkeit des Verstärkers	20 $\mu\text{V}/\text{V}$
Empfindlichkeit des Schreibers	0,5 V
Geschwindigkeit des Schreibers	120 mm/h

Der nach zwei Stunden aufgezeichnete Wert (x) wurde nach folgender Formel umgerechnet, da hundert mm des Schreibers einer Längenänderung des 50 mm langen Prüfkörpers von 0,25 mm entsprachen:

$$x \cdot 0,005 = \% \text{ lineare Expansion.}$$



Abb. 6. Folienzylinder mit Gips gefüllt, darauf das Eisenblechplättchen mit Markierung

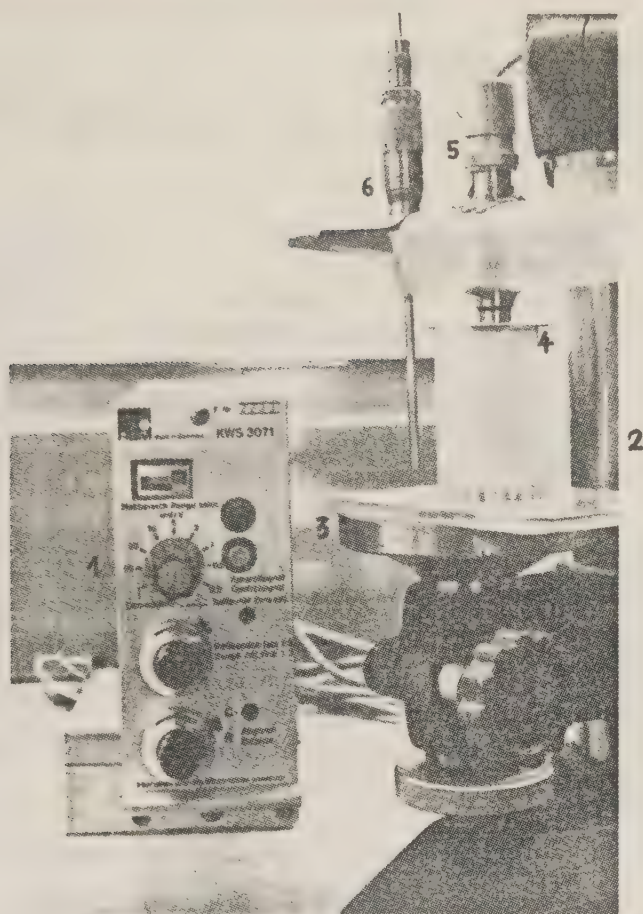


Abb. 7, Versuchsaufbau des elektronischen Verfahrens

- 1 = Verstärker
- 2 = Stativ
- 3 = Stativtisch, darauf
- 4 = Prüfzylinder mit Eisenblech
- 5 = Induktiver Nehmer, an Querstrebe des Stativs befestigt
zwischen Blech und Nehmer ist der Luftspalt zu er-
kennen
- 6 = links neben dem indukt. Nehmer: Mikrometerschraube,
Hilfe zur Einstellung des Ausgangsluftspaltes

5. Versuchsdurchführung

Der Versuchsaufbau wurde nach folgendem Zeitplan vorgenommen:

Einstreuen des Gipses in	
Aqua dest	10 sec
Sumpfdauer	20 sec
Mechanisches Anrühren unter	
Vakuum	30 sec
Einfüllen des Gipsbreies	30 sec
Einstellen der Prüfapparatur	<u>30 sec</u>
Versuchsbeginn nach Einstreuen	120 sec
= Beginn der Messung	

Anmerkungen:

Während der Sumpfdauer wurde der Gips schon manuell vorgerührt, um ein Ansaugen von Gipspulver in die Vakuumpumpe des mechanischen Anrührgerätes zu vermeiden. Die Einstellung der Meßapparatur umfaßte

bei I und II: Lösen der Arretierungsschrauben und Einstellen der Meßuhr auf Null,

bei III:

- a) Aufbringen der Messingwanne auf den Mikroskopisch und Befestigung derselben
- b) Entfernen des Arretierungsbolzens und der Platzhalterklötze
- c) Einstellen der Meßlinie unter dem Fadenkreuz des Meßmikroskops und Nullpunkteinstellung der unteren Mikrometerschraube,

bei IV: hier wurde ein zusätzlicher Zeitaufwand von ca. 60 sec für die bei jedem Versuch notwendigen Einstellungen benötigt:

- a) Aufbringen der Metallplatte auf den Gipszylinder und Ausrichten unter dem induktiven Nehmer
- b) Das Einstellen des Ausgangsluftspaltes
- c) Einstellen des Verstärkers (sog. C-Abgleich, R-Abgleich, Nullpunkt)
- d) Nullpunktkorrektur am Schreiber, Bandbreitenkorrektur

6. Ergebnisse - Tabellen - Graphiken

Tabelle 1

Quellungsmeßgerät

Gips	(% lineare Expansion)				
	x_1	x_2	x_3	$\bar{x}$	s
Alabastergips Non plus ultra 100 + 50	0,270	0,252	0,255	0,259	0,009
Alphadur 700 100 + 24	0,159	0,168	0,195	0,174	0,018
Begodur 100 + 25	0,099	0,102	0,108	0,103	0,004
Duroc 100 + 24	0,078	0,081	0,075	0,078	0,003
Moldabaster 100 + 50	0,255	0,246	0,252	0,251	0,004
Moldano 100 + 30	0,174	0,171	0,168	0,171	0,003
Moldaroc 110 + 30	0,243	0,267	0,303	0,271	0,030
Rapidur 100 + 23	0,126	0,129	0,132	0,129	0,003
SR Ivocap	0,453	0,435	0,465	0,451	0,015
Tewestone 100 + 23	0,168	0,171	0,198	0,179	0,016
Velmix Stone Kerr 100 + 25	0,108	0,105	0,108	0,107	0,001
Wipogranit 100 + 33	0,156	0,171	0,174	0,167	0,009

Anmischverhältnis: g Gips + g Aqua dest.

n = 3 (Zahl der Versuche pro Gips)

$x_1 - x_3$ = Ergebnisse der Versuche $n_1 - n_3$ }
 $\bar{x}$ = Mittelwert } in: % Expansion
s = Standardabweichung

Tabelle 2
Extensometer

Gips	(% lineare Expansion)				
	x_1	x_2	x_3	$\bar{x}$	s
Alabastergips	0,240	0,230	0,230	0,233	0,005
Non plus ultra					
Alphadur 700	0,140	0,140	0,140	0,140	0,000
Begodur	0,110	0,090	0,100	0,100	0,010
Duroc	0,060	0,060	0,050	0,056	0,005
Moldabaster	0,200	0,180	0,190	0,190	0,010
Moldano	0,150	0,120	0,140	0,136	0,015
Moldaroc	0,200	0,240	0,250	0,230	0,026
Rapidur	0,130	0,130	0,130	0,130	0,000
SR Ivocap	0,450	0,440	0,400	0,430	0,026
Tewestone	0,110	0,140	0,130	0,126	0,015
Velmix Stone	0,100	0,110	0,100	0,103	0,005
Kerr					
Wipogranit	0,150	0,150	0,140	0,146	0,008

Tabelle 3
Meßmikroskop

Alabastergips	0,223	0,226	0,223	0,224	0,001
Non plus ultra					
Alphadur 700	0,143	0,136	0,140	0,140	0,003
Begodur	0,096	0,080	0,086	0,087	0,008
Duroc	0,066	0,066	0,066	0,066	0,000
Moldabaster	0,190	0,180	0,186	0,185	0,005
Moldano	0,156	0,183	0,163	0,167	0,013
Moldaroc	0,260	0,223	0,220	0,234	0,022
Rapidur	0,130	0,116	0,120	0,122	0,006
SR Ivocap	0,420	0,433	0,416	0,423	0,008
Tewestone	0,206	0,220	0,186	0,204	0,016
Velmix Stone	0,093	0,103	0,096	0,097	0,005
Kerr					
Wipogranit	0,183	0,170	0,180	0,177	0,006

Tabelle 4

Induktiver Nehmer

Gips	(% lineare Expansion)				
	x_1	x_2	x_3	$\bar{x}$	s
Alabastergips	0,270	0,274	0,290	0,278	0,010
Non plus ultra					
Alphadur 700	0,210	0,174	0,224	0,202	0,025
Begodur	0,100	0,104	0,106	0,103	0,003
Duroc	0,060	0,064	0,076	0,066	0,008
Moldabaster	0,230	0,224	0,274	0,242	0,027
Moldano	0,220	0,222	0,210	0,217	0,006
Moldaroc	0,264	0,390	0,300	0,318	0,064
Rapidur	0,140	0,134	0,150	0,141	0,008
SR Ivocap	0,724	0,620	0,560	0,634	0,082
Tewestone	0,134	0,154	0,170	0,152	0,018
Velmix Stone	0,144	0,160	0,164	0,156	0,010
Kerr					
Wipogranit	0,220	0,174	0,224	0,206	0,027

Tabelle 5

Gipsexpansion - Durchschnitt aller 12 Messungen (4 Verfahren)
in Reihenfolge der Exp. (s. Abb. 10)

Gips	(% lineare Expansion)
1. Duroc	0,067
2. Begodur	0,098
3. Velmix Stone	0,116
4. Rapidur	0,130
5. Alphadur 700	0,164
6. Tewestone	0,165
7. Moldano	0,173
8. Wipogranit	0,174
9. Moldabaster	0,217
10. Alabaster non plus ultra	0,248
11. Moldaroc	0,263
12. SR Ivocap	0,484

Tabelle 6

Durchschnittliche Standardabweichung der einzelnen Gipse bei allen 12 Messungen (4 Verfahren) in Reihenfolge (s. Abb. 10)

Gips	Standardabweichung in % lin. Expansion
1. Duroc	0,004
2. Rapidur	0,004
3. Velmix Stone	0,005
4. Alabaster non plus ultra	0,006
5. Begodur	0,006
6. Moldano	0,009
7. Alphadur 700	0,011
8. Moldabaster	0,011
9. Wipogranit	0,012
10. Tewestone	0,016
11. SR Ivocap	0,032
12. Moldaroc	0,035

Tabelle 7

Durchschnittliche Standardabweichung der 4 Verfahren bei allen Gipsen in Reihenfolge (s. Abb. 11)

Verfahren	Standardabweichung in % lin. Expansion
1. "Meßmikroskop"	0,007 ($\hat{=}$ 1,000)
2. Quellungsmeßgerät	0,009 ($\hat{=}$ 1,285)
3. Extensometer	0,010 ($\hat{=}$ 1,428)
4. Induktiver Nehmer	0,024 ($\hat{=}$ 3,428)

() = in Relation zur geringsten Sa. ("Meßmikroskop")

Tabelle 8

Durchschnittswerte aller Expansionswerte pro Verfahren, ermittelt aus 36 Messungen, in Reihenfolge (s. Abb. 9)

Verfahren	% absolute lin. Expansion	in Relation zum - Extensometer
1. Extensometer	0,168	$\hat{=}$ 100 %
2. "Meßmikroskop"	0,177	$\hat{=}$ 105 %
3. Quellungsmeßgerät	0,195	$\hat{=}$ 116 %
4. Induktiver Nehmer	0,226	$\hat{=}$ 134 %

Tabelle 9 (Statistik)

Varianzanalysentabelle

a	b	c	d	e
1	11	1,56816	0,14256	347,71
2	3	0,07052	0,02351	57,34
12	33	0,09363	0,00284	6,93
Wdh.	96	0,03903	0,00041	
Total	143	1,77134		

a = beteiligte Einflußgrößen, 1 = Gips, 2 = Verfahren,

12 = Wechselwirkungen zwischen 1 und 2

b = Anzahl der Freiheitsgrade (= Anzahl der Klassen minus 1)

c = Summe der Abweichungsquadrate (SAQ)

d = Mittlere Abweichungsquadrate (MAQ)

e = F-Wert

weitere Erläuterung im Text S. 38 ff

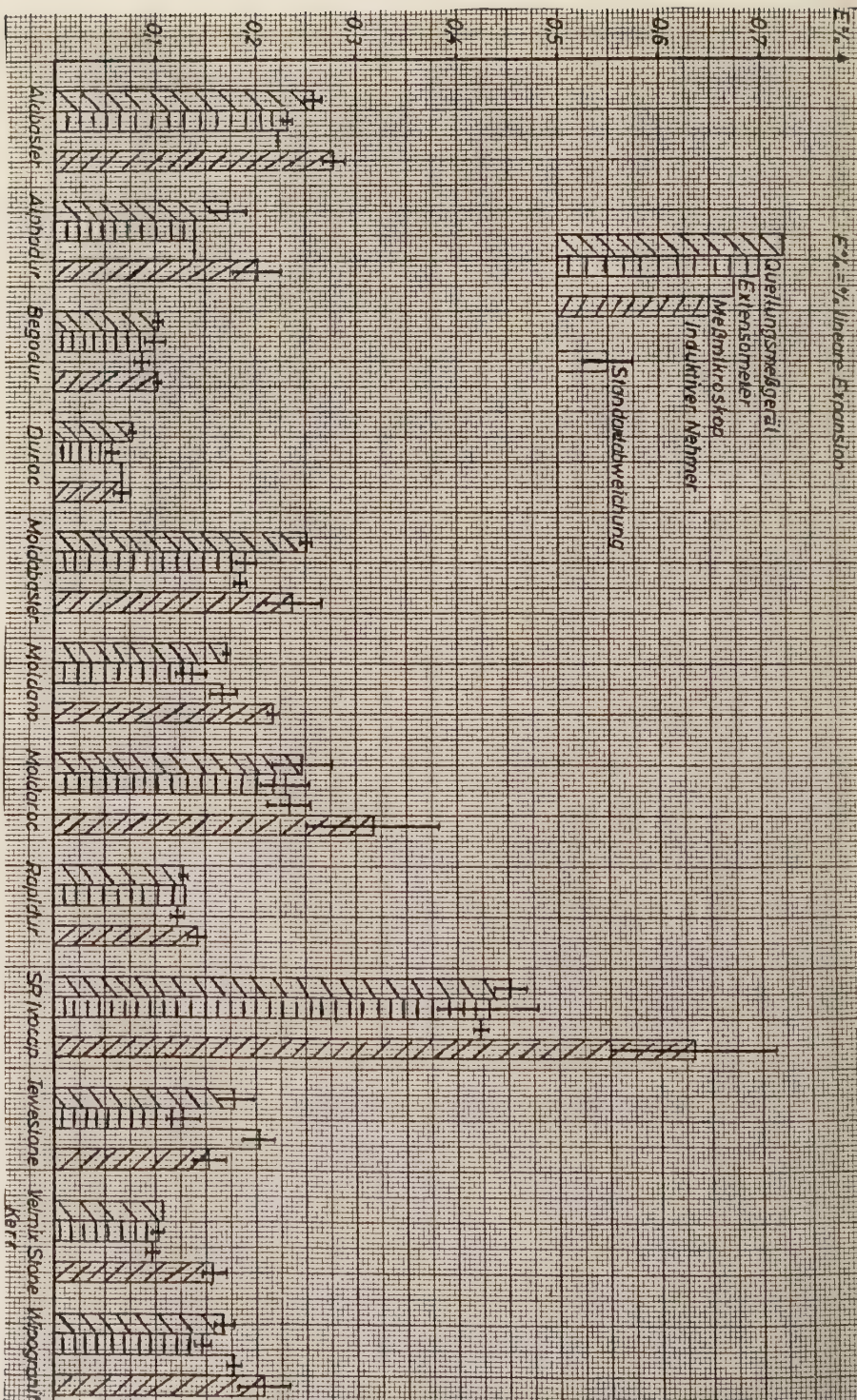


Abb. 8: Durchschnittliche Abbindeexpansion und Standardabweichung der 12 Gipse bei den 4 Verfahren

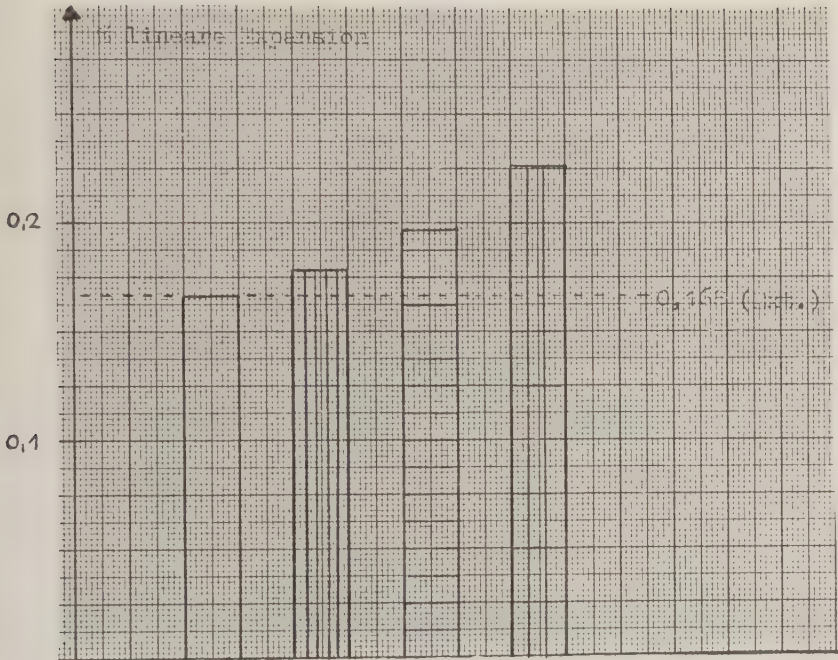


Abb. 9

Durchschnittliche Abbindeexpansion der 4 Verfahren,
ermittelt aus allen 36 Messungen der 12 Gipse
in Reihenfolge (Tab. 8)



Extensometer "Meßmikroskop" Quellungsmeßg. Indukt. Nehmer

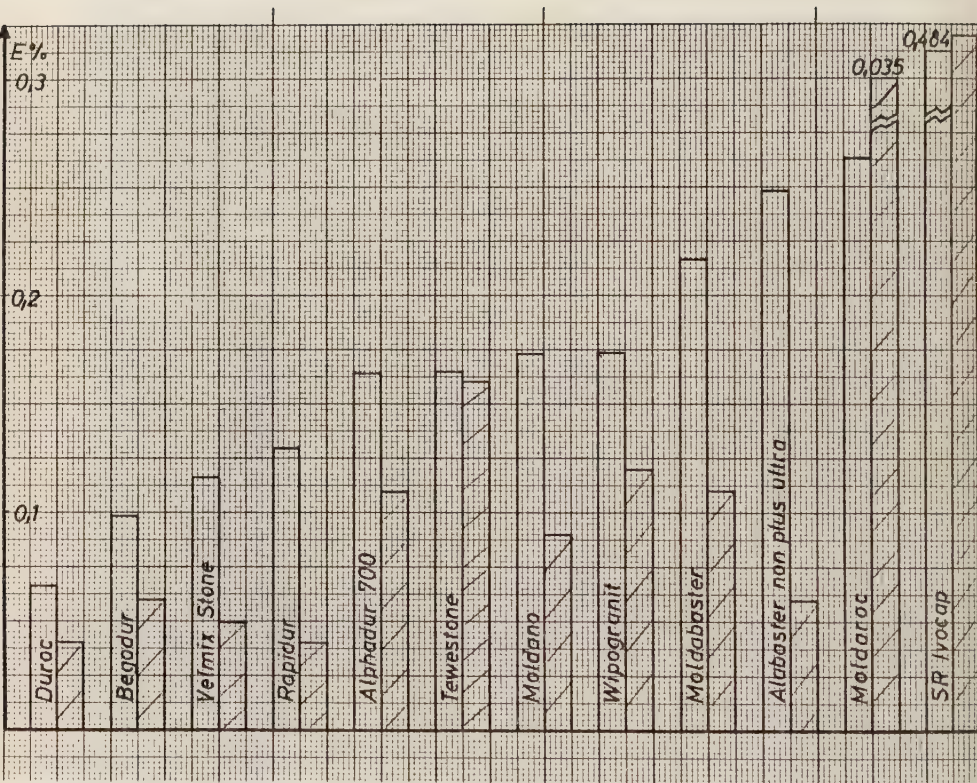


Abb. 10

- a) Durchschnittliche Abbindeexpansion der einzelnen Gipse
 Durchschnitt aller 12 Messungen (4 Verfahren)
 in % lineare Expansion (E%), in Reihenfolge der Exp.
- b) Durchschnittliche Standardabweichung der einzelnen
 Gipse - Durchschnitt aller 12 Messungen (4 Verfahren)
 in % lin. Expansion (in 10-facher Überhöhung gezeichnet)

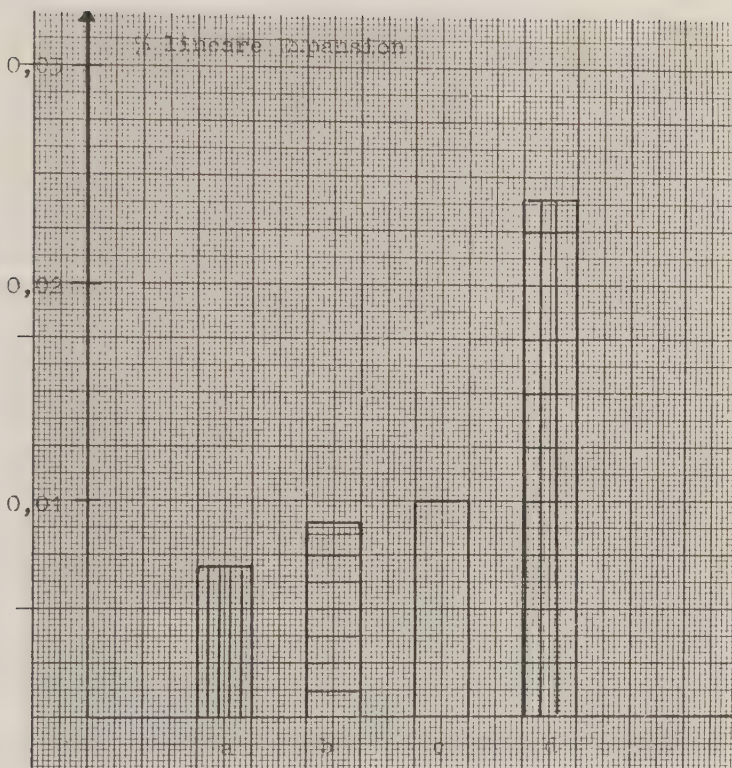


Abb. 11

Durchschnittliche Standardabweichung der 4 Verfahren,
ermittelt aus allen 36 Messungen pro Verfahren
in Reihenfolge (Tab. 7)

- a = "Meßmikroskop"
- b = Quellungsmeßgerät
- c = Extensometer
- d = Induktiver Nehmer

7. Ergebnisse - Auswertung

a) Gipse

Da die vorliegende Arbeit in erster Linie die Verfahren zum Inhalt hat und nicht die Gipse, soll die gipsbezogene Auswertung nur kurz abgehandelt werden.

Die Gipse zeigen gemäß ihrer Herstellung und entsprechend ihrem Verwendungszweck eine unterschiedliche Größe der Abbindeexpansion. Die durchschnittlichen Expansionswerte liegen zwischen 0,067 (Duroc) und 0,484 % (SR Ivocap). Die ADA-Spezifikation und die DIN 13 911 setzen die Expansion, die ein Gips maximal haben darf, wie folgt fest (9, 10):

Typ I	Abdruckgips	0,15 (ADA) (nicht untersucht)
Typ II	Modellgips (Alabastergips)	0,3
Typ III	Hartgips	0,2
Typ IV	Hartgips - extrahart (Stone)	0,1 (ADA), 0,12 (DIN) maximale Abbinde- expansion in %

Alle untersuchten Gipse lagen innerhalb des geforderten Bereichs mit drei Ausnahmen:

Velmix Stone genügt mit 0,116 wohl der DIN, nicht aber der ADA-Vorschrift, man kann ihn nach dem vorliegenden Ergebnis somit noch in dem oberen Bereich der Norm liegend einordnen. Moldaroc als Stonegips liegt mit 0,26 % weit außerhalb der festgelegten Grenze. Zu ähnlichen Ergebnissen bei diesen Gipsen kamen in ihrer Untersuchung auch MERKATZ und KLÖTZER (4).

Das Modellmaterial SR Ivocap, das nicht mit Aqua dest. sondern mit einer mitgelieferten Flüssigkeit angemischt wird, erreichte mit durchschnittlich 0,484 % die weit- aus stärkste Expansion. Dieses spezifische Volumenverhalten

ist jedoch vorgesehen, da das Material seinen Einsatzbereich in einem speziellen Kunststoffspritzgußverfahren hat.

Konsistenz und Konstanz der Ergebnisse

Die derberen Gipsbreie der zur Erzielung einer großen Härte mit wenig Wasser angerührten Stonegipse ließen sich erwartungsgemäß weniger gut verarbeiten als die Gipssorten, die nach Anmischen in Standardkonsistenz einen dünnflüssigeren Brei ergaben. Als nachteilig erwies sich diese Tatsache bei dem Fabrikat Moldaroc mit seiner extrem steifen Konsistenz. Zudem begann hier der Abbindevorgang so frühzeitig, daß bei dem bezüglich Versuchsvorbereitung langwierigsten Verfahren IV) der Messungsbeginn mitten in die Abbinde- und damit Expansionsphase fiel. Bei der Verwendung einer zweiten Gipsprobe zur Ausschließung von Materialfehlern oder Verderbenheit des Pulvers wiederholten sich die Ergebnisse in der gleichen Größenordnung.

Hier ist sicher auch die Ursache dafür zu suchen, daß Moldaroc mit der größten durchschnittlichen Standardabweichung von 0,035 % die größte Streuung in seinen Meßwerten aufweist. Es folgt SR Ivocap mit einem Wert von 0,032 %. Am besten in der Konstanz ihrer Ergebnisse schneiden die Stonegipse Duroc und Rapidur mit einer Standardabweichung von 0,004 % Exp. ab; mit einem Wert unter 0,01 % zeigen auch Alabaster non plus ultra, Bego-dur, Moldano und Velmix Stone eine deutliche Tendenz zu konstanten Ergebnissen.

Der synthetische Modellgips Tewestone unterscheidet sich von allen anderen benutzten Gipsen durch eine dünnflüssige Standardkonsistenz, das Ausgießen der Prüfkörper wurde somit wesentlich erleichtert, da die Verwendung eines Rüttlers nicht notwendig war.

b) Verfahren

Ergebnis:

1. Die Verfahren liefern unterschiedliche Ergebnisse.
2. Die Verfahren liefern unterschiedlich konstante Ergebnisse.

Eine identische Reihenfolge in der Größe der Meßwerte ist nicht bei allen Gipsen bzw. Versuchen festzustellen, doch läßt sich eine eindeutige Tendenz erkennen, die gut zum Ausdruck kommt, ermittelt man den Durchschnittswert aller pro Gerät durchgeführten Messungen (s. Tab. 8, Abbildung 9).

In den Ergebnissen unterscheiden sich die 4 Verfahren folgendermaßen:

Verfahren II ergab im Durchschnitt die niedrigsten Expansionswerte. Es folgten in Reihenfolge Verfahren III, I und IV mit den höchsten Werten.

Um das Verhältnis besser zu kennzeichnen, wurden diese Mittelwerte so umgerechnet, daß der niedrigste (V. II) für 100 % genommen würde und die anderen hierzu in Relation gesetzt. So sieht man, daß Verfahren IV durchschnittlich 30 % höhere Werte ergab als Verfahren II.

Verfahren II und III liegen mit nur 5 % Unterschied dicht zusammen, bei 6 Gipsen ergab Verfahren II einen höheren Wert, fünfmal war das Ergebnis von Verfahren III höher, ein Gips brachte hier identische Werte.

Zwischen Verfahren III und Verfahren I beträgt der Sprung 11 %, die größte Stufe liegt jedoch zwischen Verfahren I und IV mit 18 %. Hier sieht die Verteilung so aus:

bei nur 3 Gipsen liegt die durchschnittliche Expansion von Verfahren I über Verfahren IV, einmal sind die Werte gleich, bei 8 Gipsen ergibt Verfahren IV den größeren Wert.

Von dem groben Muster (II - III - I - IV), das die 4 Durchschnittswerte der Expansionsmessungen zeigt, weicht der synthetische Gips Tewestone ab, er zeigt bei Verfahren III einen relativ großen und bei Verfahren IV einen unerwartet kleinen Mittelwert. Möglicherweise sind hierfür von den "natürlichen" Gipsen abweichende material-spezifische Faktoren verantwortlich zu machen. Da auch sein bei Verfahren I errechneter Wert relativ hoch liegt, kann als andere mögliche Ursache für dieses von den anderen Gipsen abweichende Verhalten vermutet werden, daß hier die Länge des Prüfkörpers einen gewissen Ein-

fluß auf das Ergebnis hatte. Zum anderen zeigt Tewestone eine sehr geringe Kontraktion vor der Abbindeexpansion. Da die Kontraktion bei der Auswertung der Messungen des IV. Verfahrens mitberücksichtigt wurde, erklären sich die relativ geringen Ergebniswerte auch hierdurch. Die Frage, inwiefern die Länge des Prüfkörpers das Ergebnis beeinflusst, kann hier nicht entschieden werden. Nach ADA-Spezifikation Nr. 25 soll "die Länge der ausgeflossenen Masse 36 cm nicht überschreiten". Betrachtet man die vom Meßprinzip her ähnlichen Verfahren I bis III, so sieht die Gegenüberstellung folgendermaßen aus:

<u>Verfahren</u>	<u>Prüfkörperlänge</u>	<u>durchschn. Expansion in %</u>
II	100 mm	0,168 $\pm$ 1
III	360 mm	0,177 $\pm$ 1,05
I	333 mm	0,195 $\pm$ 1,16

Auffanllend ist hier der Vergleich II - I, die Verfahren entsprechen sich weitgehend, Hauptunterschied ist die Prüfkörperlänge. Verfahren I mit über dreifacher Länge von Verfahren II erbrachte deutlich höhere Expansionswerte von durchschnittlich 16 %, woraus sich die Vermutung ergibt, daß die Abbindeexpansion innerhalb gewisser Grenzen mit der Zunahme der Länge oder des Volumens des Prüfkörpers größer wird. Diese Kausalität müßte jedoch durch weiterführende Untersuchungen bestätigt werden. Hierzu würde sich beispielsweise eine Modifikation des Quellungsmeßgerätes anbieten, das mit herausnehmbaren Querwänden in verschiedenen Abständen zur Meßuhr ausgestattet sein müßte. Somit könnten Prüfkörper verschiedener Länge mit derselben Meßapparatur untersucht und ein möglicher Einfluß dieser Größe auf das Ergebnis explizit geprüft werden.

Untersucht man in diesem Zusammenhang die Resultate des III. Verfahrens, so sieht man, daß hier die Werte "nur" 5 % über denen von Verfahren II liegen, und das bei einer Prüfkörperlänge von 360 zu 100 mm, so daß

ein Einfluß der Länge wieder in Frage gestellt zu sein scheint. Es ist jedoch nicht auszuschließen, daß für die relativ niedrigen Ergebnismwerte spezielle Eigenschaften der Apparatur verantwortlich zu machen sind:

1. die vom expandierenden Gips bewegten Elemente sind wesentlich schwerer als bei den anderen Geräten
2. sie berühren sich auf einer verhältnismäßig großen Fläche. Somit wirken a) das Gewicht der Meßschienen, b) Reibungskräfte an der langen Berührungsseite derselben und c) eventuell Adhäsionskräfte der Expansionskraft des Gipses entgegen. Die Adhäsion kann verursacht werden durch einen Wasserfilm zwischen den Berührungsflächen, sie bilden praktisch einen kapillaren Raum, wenn sie satt aneinander liegen. Die oben aufgeführten Faktoren verursachen möglicherweise einen zu kleinen Expansionswert.

Verfahren IV, das aufgrund seiner gänzlich verschiedenen Meßtechnik bei der Prüfung der Gipskörperlänge als Einflußgröße außer acht gelassen wurde, sollte bei der geringen Länge von 50 mm nach dem eben gesagten relativ kleine Werte zeigen. Dies trifft jedoch nicht zu, eindeutig hat das elektronische Verfahren die größten Expansionswerte erbracht. Hierfür können in erster Linie folgende 3 Faktoren die Ursache sein:

1. das Meßprinzip
2. die Empfindlichkeit des Verfahrens
3. die Problematik der Auswertung der vom Schreiber aufgezeichneten Kurve.

Ad 1. Das Verfahren arbeitet berührungslos und ohne Bewegung mechanischer Teile (abgesehen vom Schreiber). So entfallen jegliche Verfälschungen durch Reibungswiderstand, Adhäsionskräfte etc.

Ad 2. Die elektronische Registrierung und Verstärkung ist den anderen 3 Methoden an Empfindlichkeit weit Überlegen.

Ad 3. Die Auswertung unterscheidet sich grundlegend

von der der Verfahren I bis III. Dort wurde eine Meß-
vorrichtung bei Versuchsbeginn nach festem Zeitplan
eingestellt (Nullwert) und nach 2 Stunden abgelesen.
Hier wurde eine Kurve aufgezeichnet, die etwa folgenden
typischen Verlauf aufwies:

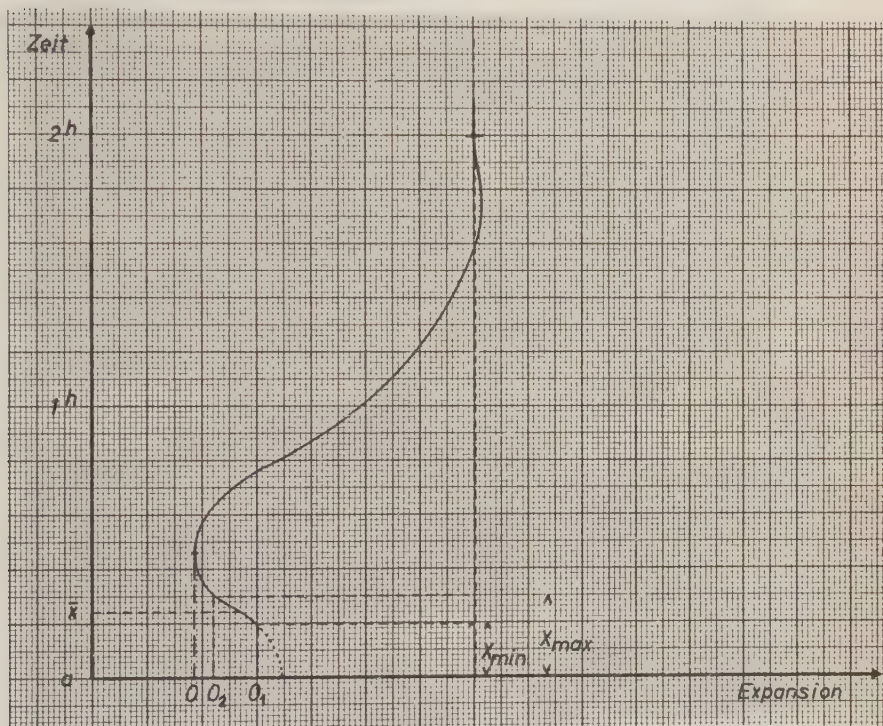


Abb. 12: Kurvenverlauf beim elektronischen Verfahren

x = Beginn der Registrierung des Schreibers = Zeit
des Versuchsaufbaus

$x_{\min}$ = kürzeste Zeit

$x_{\max}$ = längste Zeit

$\bar{x}$ = durchschnittliche Zeit

O_1 und O_2 = zu $x_{\min}$ und $x_{\max}$ zugeordnete Ausgangswerte
der Expansionsmessung

O = Umschlagpunkt von Kontraktion zu Expansion, dieser
Wert wurde als Ausgangspunkt der Expansionsmessung
festgesetzt

weitere Erklärungen im Text

Der gestrichelte Teil der Kurve wurde nicht aufgezeichnet, er entspricht dem angenommenen Volumenverhalten des Gipses vom Anmischen bis zum Meßbeginn und beinhaltet die Zeit des Versuchsaufbaus. Je nach Verarbeitbarkeit des Gipsbreies und nach erforderlichen Korrekturen der Apparatur schwankte der Zeitpunkt des Meßbeginns innerhalb bestimmter Grenzen ($\bar{x}$). Der Schreiber bewegte sich zunächst nach links, d.h. der Gipsbrei zeigte in seiner initialen Abbindephase eine Volumenverminderung (Kontraktion). Diese Phase war bei den anderen Verfahren, wenn überhaupt, nur bei Gipsen mit extremen Volumenverhalten zu erkennen, ein Indiz für die sehr hohe Empfindlichkeit der elektronischen Messung.

Der Zweistundenwert war jeweils zweifelsfrei zu kennzeichnen ($\rightarrow$), als problematisch erwies sich jedoch die Festlegung des Meßbeginns und damit des Nullpunktes, da der Beginn der Aufzeichnung deutlich erkennbar in die Kontraktionsphase der Gipsmasse fiel. Je nach Stärke und Schnelligkeit dieser Kontraktion und nach Zeitpunkt des Beginns (Versuchsaufbaudauer) waren unterschiedliche Werte zu erwarten ($O_1 - O_2$).

So wurde zwecks Schaffung möglichst adäquater Bedingungen der bei fast jeder Kurve erkennbare Umschlagspunkt von Kontraktion zu Expansion als Nullpunkt eingesetzt (0), woraus im Vergleich zu Verfahren I bis III ein absolut größerer Expansionswert resultierte, da ein Teil der anfänglichen Kontraktion praktisch zum reinen Expansionswert addiert wurde.

Ergebniskonstanz

Als Maß für die Streuung der Ergebnisse einerseits und für ihre Konstanz andererseits wurde für jedes Verfahren ein Durchschnittswert der Standardabweichung ermittelt, welches sich aus allen 12 Werten ergab (s. Tab. 7). Liegen die 3 Werte einer Versuchsreihe weit auseinander - Beispiel: SR Ivocap mit den 3 Werten 0,724--0,620--0,560 ergibt Sa. 0,082 (V.IV) - so ergibt dies eine hohe Standardabweichung.

Der entgegengesetzte Extremfall mit drei gleichen Werten ergibt die Standardabweichung = 0 - Beispiel: Alphasur V. III $0,140 - 0,140 - 0,140$ ergibt Sa. 0.

Verantwortlich für die Größe der Streuung wurden folgende Faktoren ermittelt:

1. Empfindlichkeit des Verfahrens. Ein verhältnismäßig träge reagierendes Verfahren neigt zu konstanteren Ergebnissen.
2. Länge des Prüfkörpers. Eine absolute Differenz von z.B. $1/100$ mm fällt bei kurzem Prüfkörper mehr ins Gewicht als bei einem langem, die Abweichung wird bei dem kurzen Pk. einen größeren prozentualen Wert ergeben.
3. Fehlerneigung eines Verfahrens. Die komplexe Elektronik des induktiven Nehmers ist störanfälliger als die anderen Geräte, mögliche Fehlerquellen sind gegeben durch
 - a) Aufnehmerspule
 - b) Verstärker
 - c) Schreiber
 - d) eingestellte Empfindlichkeitswerte, Linearität nimmt mit zunehmender Empfindlichkeit ab.

Bei dem Quellungsmeßgerät ergaben Vorversuche, daß die Meßungenauigkeit zunahm, wenn die beweglichen Teile nicht vor jedem Versuch mittels Öl gängig gemacht wurden.

4. Gipssorte, speziell Verarbeitungseigenschaften (s. dort).

Resultate

Die konstantesten Messungen lieferte das "Meßmikroskop", gefolgt vom Quellungsmeßgerät und Extensometer. Mit Abstand erst - Streuung 3,4-mal so groß wie "Meßmikroskop" - folgt der induktive Nehmer. Erklärt werden kann diese Reihenfolge mit dem oben Gesagten: Verfahren III hat den längsten Prüfkörper, seine Mechanik arbeitet relativ träge, aber möglicherweise ist die optische Messung mittels Meßmikroskop den mechanisch arbeitenden Meßuhren an Präzision überlegen. Verfahren I streut etwas mehr als Verfahren II, vermutlich infolge der unterschiedlichen Gipskörperlänge. Verfahren IV zeigt die stärkste Streuung, hier finden sich ein kurzer Gipsprüfkörper, eine hohe Empfindlichkeit und eine relativ große Störanfälligkeit.

8. Die Prüfverfahren - Erfahrungen und Kritik

I) Quellungsmeßgerät

Das Gerät ermöglicht ein unkompliziertes Arbeiten mit zügigem Versuchsaufbau. Lediglich das Einfüllen von zähem Gips bei gestaltet sich etwas problematisch, da wegen der Größe der Meßwanne eine recht große Gipsmenge benötigt wird. Die Verwendung eines Rüttlers scheidet aus, da dieser durch das Gewicht der Apparatur Schaden leiden würde. Beim Einbringen des Gipses ist ferner darauf zu achten, daß sich - besonders an den Stirnseiten - keine großen Luftblasen bilden. Zeigte es sich, daß die bewegliche (der Meßuhr zugelegene) Stirnwand nicht gleichmäßig mit Gips bedeckt war, wurde der Versuch wiederholt, weil Kippmomente oder Verkantungen, die u.U. eine Fehlerquelle hätten bilden können, nicht ausgeschlossen werden konnten.

Die Meßuhr mit einer Ablesegenauigkeit von $1/100$ mm und die Mechanik des Gerätes gewährleisteten ausreichend exakte Ergebnisse, vorausgesetzt, die beweglichen Bestandteile sind sauber und mit Öl versehen.

Die ermittelten Expansionswerte liegen etwa im Mittelfeld der vier Verfahren, die Streuung der Ergebnisse mit einem Maximalwert von $0,03$ % lineare Expansion ist für Praxisbelange ohne Bedeutung.

II) Extensometer

Das Gerät ist relativ problemlos zu bedienen. Zu bemängeln ist die ungünstige Platzierung der Arretierungsschraube des Stopperwürfels. Sie lag unterhalb der Meßuhrbefestigung, so daß ihr Lösen etwas umständlich war und sehr behutsam zu erfolgen hatte, da Erschütterungen des Gerätes in diesem Stadium unbedingt zu unterlassen waren. Denn durch deren Rüttelwirkung neigten - in besonderem Maße dünnflüssige - Gipse dazu, den Stopper zu verschieben, wodurch sich die Ausgangslänge des Prüfkörpers veränderte und somit eine Wiederholung des Ver-

suches notwendig wurde. Die Platzierung der Schraube seitlich oder oberhalb der Meßuhr wäre zu empfehlen. Die V-Rinne wurde mit einer Teflonfolie ausgekleidet, die auch bei den Verfahren III und IV Anwendung fand. Diese Folie zeigte sich anderen Materialien, die für diesen Zweck empfohlen wurden, überlegen, wie etwa der "Parafilm M" oder "Kofferdam"-Gummi. Diese Folien verhindern zwar eine Adhäsion des Gipses an der jeweiligen Prüfkörperform; da sie jedoch sehr dünn und weich sind, haftet der erstarrte und expandierende Gipsblock an der Folie selbst, er gleitet nicht auf der Folie, sondern zieht sie bei Ausdehnung mit in die Länge. Die bei den vorliegenden Versuchen verwendete Folie ist steifer und relativ formstabil, sie ließ sich gut falzen und an die benutzte Hohlform adaptieren. Dieses sogenannte selbstschmierende Material zeichnet sich durch extreme Gleitfähigkeit aus, es kommt zu keinerlei Haftung zwischen Gips und Folie sowie Folie und Form, so daß die "Fehlerquelle" Adhäsion ausgeschaltet werden konnte. Zudem erweist sich der Gebrauch der Folie als sehr wirtschaftlich, da sie

1. sehr stabil ist und

2. aufgrund ihrer wasserabstoßenden Eigenschaft keinerlei Verschmutzung durch Gipsreste, Wasserflecken oder dergleichen zurückbleiben, sodaß eine dem Gerät angepaßte Einlage praktisch unbegrenzt Verwendung finden kann.

Als noch elegantere Lösung würde sich anbieten, Hohlform und bewegliche Teile der Geräte mit Teflon oder ähnlichem zu beschichten, somit könnte auf eine Auskleidung mittels Folie gänzlich verzichtet werden.

Dank des geringen Gewichts und der kleinen Abmessungen des Extensometers konnte der Gipsbrei bei Bedarf mit Hilfe eines Rüttlers eingebracht werden.

Das Gerät lieferte im Durchschnitt die niedrigsten Expansionswerte, hierfür ist vermutlich unter anderem die geringe Prüfkörperlänge verantwortlich zu machen. Das Verfahren wies die zweitstärkste Streuung seiner Ergebnisse auf, doch blieb auch hier die Streuung ohne praktische Auswirkung auf die Gipsprüfung.

III) "Meßmikroskop"

Die Apparatur zur Prüfung der Abbindeexpansion mit Meßmikroskop erforderte im Versuchsaufbau nur einen unmaßgeblich längeren Zeitaufwand. Bei sehr derbem Gipsbrei erwies sich das vollständige Einbringen der mit den Markierungslinien versehenen Schienen als schwierig. Ansonsten war das Arbeiten mit dem "Meßmikroskop" unproblematisch, die Auflich-Optik mit Fadenkreuz in Verbindung mit den Mikrometerschrauben am Objektiv und am Mikroskoptisch, die eine Einstellgenauigkeit von $1/100$ mm hatten, ermöglichte exakte Messungen.

Das Verfahren erbrachte die zweitniedrigsten Expansionswerte, im Durchschnitt nur 5 % höher als Verfahren II, deutlich aber zeigten hier die Ergebnisse die geringste Streuung, wofür folgende zwei Ursachen als verantwortliche zu sehen sind:

1. die schon erwähnte relativ große Trägheit der Apparatur,
2. das Meßmikroskop ist vermutlich den mechanischen Meßuhren an Genauigkeit der Registrierung überlegen. Die V-förmige Rinne wurde auch hier mit der schon beschriebenen Teflonfolie ausgekleidet, was sich auch bei diesem Gerät bestens bewährte.

IV) Elektronisches Verfahren

Das Verfahren ist den anderen an Genauigkeit und Empfindlichkeit überlegen, der Versuchsaufbau ist jedoch verhältnismäßig kompliziert und langwierig; um zeitgerecht alle Arbeitsgänge abzuschließen, ist ein gewisses Training der immer wieder erforderlichen Einstell- und Abgleichvorgänge notwendig. Das Verfahren zeigt gelegentlich spontane Aberrationen, deren Ursache teilweise nicht eruiert werden konnten, erkenntlich an plötzlichen Ausschlägen des Schreibers, die dann einen unregelmäßigen, gezackten Kurvenverlauf zur Folge hatten. Prinzipiell kommen als Fehlerquellen in Frage:

1. der induktive Aufnehmer
2. der Verstärker

3. der Schreiber.

Durch die Aufzeichnung von Testkurven zeigte sich, daß gelegentlich der Schreiber unkontrollierte Ausschläge vollführte, eine Ursache konnte hierfür nicht festgestellt werden. Die so vom Schreiber herrührenden Unregelmäßigkeiten waren als solche gut zu erkennen, sie führten zu einer Wiederholung des Versuches.

Der Verstärker arbeitete nach den vorliegenden Erfahrungen absolut fehlerfrei und zuverlässig.

Hauptursache für Unregelmäßigkeiten im Kurvenverlauf schien der induktive Nehmer zu sein. Zwar liegen keine Hinweise für fehlerhaftes Arbeiten desselben vor, jedoch ist hier sicher der empfindlichste Baustein in der Versuchsanordnung zu suchen, woraus sich eine große Bereitschaft erklären läßt, auf externe Störquellen zu reagieren, wie etwa - auch leichte - Erschütterungen der Meßapparatur, Temperaturschwankungen etc. Erbrachte eine Meßkurve Unregelmäßigkeiten, die nicht auf die eben besprochenen Ursachen oder auf Verfahrensfehler des Praktikanten, wie z.B. zu langsamer Versuchsaufbau, falsche Meßbereichswahl, große Luftblasen zwischen Gipsprobe und Eisenblechplatte usw. zurückzuführen waren, so wurde der Versuch nicht wiederholt, um einen gerechten Vergleich zu den anderen Verfahren zu ermöglichen und nicht das elektronische Verfahren durch eine auf einheitliche und glaubwürdige Meßergebnisse ausgerichtete Selektion zu bevorzugen.

Das Verfahren lieferte signifikant die höchsten Expansionswerte die jedoch aufgrund der speziellen Auswertung den direkten Vergleich mit den Verfahren I - III nur unter Vorbehalt zulassen.

Die elektronische Meßapparatur zeigte in seinen Ergebnissen ebenfalls die höchste Streuung, sicher eine Folge der ausführlich besprochenen Empfindlichkeit und Störanfälligkeit.

9. Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung hatte folgende Punkte zum Inhalt:

1. Bestimmung des arithmetischen Mittels aus den drei Versuchen einer Reihe (Tab. 1 - 4, Abb. 8).

Das arithmetische Mittel ist definiert als die Summe von Meßwerten, geteilt durch die Anzahl, die Bezeichnung ist $\bar{x}$ ("x quer")(1).

2. Bestimmung der Standardabweichung aus den drei Versuchen einer Reihe (Tab. 1 - 4, Abb. 8).

Der Wert der Standardabweichung gibt an, wie stark die Streuung der Einzelergebnisse einer Versuchsreihe ist, Voraussetzung: identischer Gips, identisches Gerät, identische Versuchsbedingungen.

3. Anfertigung einer 2-fachen Varianzanalyse (s. Tab. 9). Die Varianzanalyse ermöglicht bei Vorliegen einer Gesamtstreuung aller Meßergebnisse, die einzelnen Einflußgrößen gesondert auf eigene Streuung zu untersuchen sowie deren Wechselwirkungen untereinander.

Im konkreten Fall soll nun anhand der mittleren prozentualen Expansionswerte die Frage geprüft werden, inwiefern 1. die verschiedenen Gipse und 2. die verschiedenen Verfahren eine Streuung der Werte verursachen und Einfluß auf das Ergebnis nehmen, und ob 3. eine Wechselwirkung zwischen beiden Faktoren besteht. Durch das Vorliegen zweier Einflußgrößen erklärt sich die Bezeichnung doppelte oder zweifache Varianzanalyse.

Die erste Einflußgröße (Gips) hatte 12, die 2. (Verfahren) hatte 4 Klassen zum Inhalt.

Hier noch zwei Definitionen aus dem Bereich der Statistik, im Hinblick auf die Einzelheiten und Grundlagen der benutzten statistischen Verfahren sei auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen.

Die Varianz ist die Summe der Abweichungsquadrate (SAQ) aller Meßwerte von ihrem arithmetischen Mittel, dividiert durch die um eins verminderte Anzahl der Meßwerte.

$$s^2 = \frac{SAQ}{n-1}$$

Die Standardabweichung s wird mit Hilfe der Varianz bestimmt, sie errechnet sich aus ihrer Quadratwurzel (1):

$$s = \sqrt{\frac{SAQ}{n-1}}$$

Analysentabelle (Tab. 9)

In der ersten Spalte sind die Einflußgrößen Gips (1) und Verfahren (2) sowie ihre Wechselwirkungen (12) aufgeführt. Die zweite Spalte beinhaltet die Zahl der Freiheitsgrade, die sich aus der Anzahl der Klassen weniger eins ergibt. In der 3. Spalte sind die Summen der Abweichungsquadrate zu finden, die den jeweiligen Anteil an der Gesamtstreuung, die in der 5. Zeile ("Total") aufgeführt ist, charakterisieren. Die Summen der Abweichungsquadrate (SAQ) lassen jedoch einen direkten Vergleich nur zu, wenn die Anzahl der Freiheitsgrade identisch ist, es ist einleuchtend, daß bei Berücksichtigung von 11 Freiheitsgraden eher eine hohe SAQ zustande kommt als bei dem Vorliegen von 3 Freiheitsgraden. Daher wurde in der 4. Spalte noch das mittlere Abweichungsquadrat (MAQ) bestimmt, es errechnet sich aus der Division der SAQ durch die Anzahl der Freiheitsgrade. Die MAQ gibt den wirklich vorliegenden Anteil an der Gesamtstreuung wieder.

Als letzter wurde in Spalte 5 der F- Wert bestimmt, und zwar indem die MAQ von 1,2 und 12 durch die MAQ der "Wiederholung" (= 0,00041) dividiert wurden. Dieser F- wert wird ausgewertet durch Vergleich mit einem anderen F- Wert, der einer statistischen Tabelle entnommen wird und dem üblicherweise eine Irrtumswahrscheinlichkeit p von 1 % oder 5 % zugrunde gelegt ist.

Die Tabellenwerte im vorliegenden Fall hatten die Größe für $F(p = 5\%) = 1,57$

$$F(p = 1\%) = 1,89$$

Es ist also zu sehen, daß die drei in der Varianzanalyse ermittelten F- Werte über den Tabellenwerten liegen,

die Ergebnisse gelten somit als signifikant, d.h. es bestehen Unterschiede innerhalb der Faktoren 1 und 2, und es bestehen Wechselwirkungen zwischen 1 und 2. Die Reihe "Wiederholung" beinhaltet den Anteil an der Gesamtstreuung, der auf Versuchsfehler wie falsches Ablesen oder Auswerten zurückzuführen ist. Es ist deutlich zu sehen, daß der Anteil wesentlich hinter den anderen drei Zeilen zurücksteht (MAQ 0,00041 gegenüber 0,14256, 0,02351 und 0,00284).

Zur Klarstellung der Terminologie sei hier noch folgendes betont: die Streuung, von der hier gesprochen wurde, beinhaltet eine Streuung innerhalb der Gruppe der 12 Gipse bzw. der 4 Verfahren. Sie ist nicht zu verwechseln mit der Streuung der Ergebnisse innerhalb einer Versuchsreihe (3 Versuche mit gleichem Gips und gleichem Verfahren), die vorher behandelt wurde und die durch die jeweilige Standardabweichung ausgedrückt wurde.

Ergebnisse der statistischen Auswertung:

Es stellten sich folgende 3 Faktoren als signifikant heraus.

1. Die mittleren prozentualen Expansionswerte der Gipse unterscheiden sich. Dieses Ergebnis bedarf keiner Erklärung, da verschiedene Gipse untersucht wurden, die je nach Verwendungszweck auf unterschiedliche Expansion ausgelegt sind.
2. Da auch der F- Wert der Einflußgröße 2 deutlich signifikant ist, ergibt sich hieraus der Schluß, daß die Verfahren unterschiedliche Ergebnisse liefern. Der F- Wert ist jedoch wesentlich kleiner als bei Größe 1 (Gipse), d.h. das Verfahren beeinflusste die durchschnittliche Abbindeexpansion weniger stark als der verwendete Gips.
3. Auch das Bestehen von Wechselwirkungen zwischen 1 und 2 hat sich als signifikant bestätigt. Hierdurch läßt sich vielleicht die Tatsache erklären, daß die Unterschiede der Expansionswerte der einzelnen Verfahren nicht bei allen 12 Gipsen in identischer Reihenfolge liegen.

Die statistische Auswertung bestätigt somit die vorliegenden praktischen Erfahrungen und Versuchsauswertungen, Hinweise auf Hintergründe oder Gesetzmäßigkeiten sind jedoch nicht zu entnehmen.

10. Zusammenfassung

Es wurden vergleichende Messungen der linearen Abbindeexpansion 12 verschiedener Gipse mit 4 verschiedenen Verfahren durchgeführt.

Die Verfahren waren:

- I Quellungsmeßgerät
- II Extensometer
- III Apparatur zur Prüfung der Abbindeexpansion mit Meßmikroskop
- IV Elektronisches Meßverfahren mit induktivem Aufnehmer.

Die Untersuchungen brachten folgende Ergebnisse:

1. Die 4 Prüfverfahren erbringen unterschiedliche Ergebnisse.
2. Die Unterschiede zeigen sich in:
 - a) dem absoluten gemessenen Expansionswert.
Die durchschnittlich höchsten Expansionswerte zeigte Verfahren IV, es folgten I, III und II.
 - b) der Ergebniskonstanz.
Die höchste Streuung hat Verfahren IV, es folgten II, I und III.
3. Verfahren mit ähnlichem Meßprinzip bringen weniger stark differierende Ergebnisse als Verfahren sehr unterschiedlicher Konzeption.
4. Die gemessene Abbindeexpansion hängt nicht nur vom verwendeten Gips ab, sondern auch vom jeweiligen Verfahren.
5. Die verfahrensspezifischen Unterschiede bestehen nicht bei allen Gipsen einheitlich, doch ist eine eindeutige Charakteristik der einzelnen Methoden zu erkennen.

6. Die Verfahren I - III sind für Expansionsmessungen gut geeignet, sie liefern ausreichend exakte und zuverlässige Ergebnisse (gemessen an den Anforderungen für dentale Gipsprodukte).
7. Verfahren IV kann in der vorliegenden Form noch keine überzeugende Alternative bieten. Ausgehend von einem durchaus interessanten, sich stark abhebendem Konzept hat es sich als störanfällig und in Durchführung und Auswertung noch nicht zufriedenstellend erwiesen.
8. Eine absolute Messung der Abbindeexpansion gibt es noch nicht.

11. Anhang

1) Spezifikation Nr. 25 für dentale Gipsprodukte der American Dental Association (ADA) (Auszug)

4.3.6. Abbindeexpansion

Die Längenänderung bei der Abbindeung soll durch Beobachtung der Bewegung von Markierungen bestimmt werden. Diese sind auf einem Prüfkörper in einer V- förmigen Vertiefung (90°) im Abstand von etwa 30 cm anzubringen. Die Messung soll mit einem Meßmikroskop oder durch ein Gerät gleicher Genauigkeit durchgeführt werden. Die V- förmige Vertiefung, in welche die Probe gegossen wird, soll mit Kofferdam ausgekleidet sein. Die erste Messung wird eine Minute vor Ablauf der Abbindezeit durchgeführt. Die Schlußmessung soll 2 Std. nach Mischbeginn durchgeführt werden. 300 g Gipspulver werden in Standardkonsistenz mit der exakten Wassermenge angerührt und in die vorbereitete Vertiefung gegossen. Es soll die gesamte angerührte Gipsmenge verwendet werden und die Gesamtlänge der ausgegossenen Masse soll 36 cm nicht überschreiten. Der Durchschnitt von 2 Prüfungen soll, gerundet auf die nächstliegenden 0,01 % angegeben werden.

2) DIN 13 911, Entwurf vom Dez. 1974 Zahnärztliche Werkstoffe - Gips Anforderungen - Prüfung (Auszug)

Tabelle 2

Typ	Lineare Abbindeexpansion nach 24 Std. % max.
I	-
II	0,3
III	0,2
IV	0,12

6.7.2. Lineare Abbindeexpansion

6.7.2.1. Geräte

Ein Extensometer..., bestehend aus einer V-förmigen, formstabilen, blankgezogenen Rinne mit 90° -Winkel aus Stahl oder Aluminium, ausgekleidet mit einer PTFE-Folie. Meßuhr nach DIN 878.

Stopper aus Stahl...

Klemme für Stopper.

6.7.2.2. Durchführung

Zur Durchführung werden 200 g Pulver.. gemischt (Dosierung entsprechend der Standardkonsistenz) und sofort in das Extensometer gegossen... Der Stopper ist mit einer Klemmvorrichtung zu fixieren...

6.7.2.3. Auswertung

Die Meßuhr wird ab Meßbeginn auf 0,005 mm abgelesen. Der nach 2 Stunden abgelesene Wert in mm ergibt die Expansion in %.

- 8) Weikart, P. Werkstoffkunde für Zahnärzte
München 1966
- 9) DIN 13 911, Entwurf vom
Dez. 1974
- 10) Spezifikation Nr. 25 für
dentale Gipsprodukte der
American Dental Association
(ADA)

Ich danke Herrn Professor Dr. H. Marx sehr herzlich für die Überlassung des Themas, für die Bereitstellung des Arbeitsplatzes und für seine jederzeit freundliche Unterstützung.

Frau Hahn, die mir bei der statistischen Auswertung jederzeit hilfreich zur Seite stand, sage ich ebenfalls meinen herzlichen Dank,

Lebenslauf

Am 12. Mai 1950 wurde ich als der Sohn des späteren Regierungsoberamtsrates Helmuth Bohn und dessen Ehefrau Ilse, geb. Kirsch, in Geislingen/Steige geboren. Versetzungen meines Vaters hatten Umzüge der Familie zur Folge, 1953 nach Kassel und 1957 nach Wiesbaden. Die Grundschule besuchte ich ab 1957, 1961 wechselte ich auf das humanistische Dilthey-Gymnasium in Wiesbaden, wo ich im Sommer 1969 das Reifezeugnis erlangte.

Im Herbst desselben Jahres nahm ich das Studium der Zahnheilkunde an der Johannes Gutenberg-Universität in Mainz auf. Nach der naturwissenschaftlichen Zwischenprüfung und der zahnärztlichen Vorprüfung absolvierte ich hier auch das zahnärztliche Staatsexamen im Oktober 1974.

Seit November 1974 bin ich als zahnärztlicher Assistent in freier Praxis tätig.

